

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ		
1. Датум и орган који је именовео комисију:		
2. Састав комисије у складу са <i>Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду</i> :		
1. др Татјана Лончар-Турукало	редовни професор	Телекомуникације и обрада сигнала, 26.04.2022.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		председник
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
2. др Милан Рапаић	редовни професор	Аутоматика и управљање системима, 07.10.2021.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
3. др Предраг Видовић	ванредни професор	Електроенергетика, 10.07.2020.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
4. др Мирсад Ћосовић	доцент	Електроенергетика, 25.09.2019
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Електротехнички факултет, Универзитет у Сарајеву		члан
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
5. др Дејан Вукобратовић	редовни професор	Телекомуникације и обрада сигнала, 01.04.2019.
презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		ментор
установа у којој је запослен-а		функција у комисији
6. др Драгиша Мишковић	научни сарадник	Телекомуникације и обрада сигнала, 26.09.2018.

презиме и име	звање	ужа научна област и датум избора
Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије	ментор	
установа у којој је запослен-а	функција у комисији	
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ		
<ol style="list-style-type: none"> Име, име једног родитеља, презиме: Огњен, Божо, Кундачина Датум рођења, општина, држава: 18.10.1994, Невесиње, Босна и Херцеговина Назив факултета, назив претходно завршеног нивоа студија и стечени стручни/академски назив: Факултет техничких наука, Мастер академске студије, Мастер електротехнике и рачунарства Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: 2018, Енергетика, електроника и телекомуникације 		
III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:		
Примена метода дубоког учења за надгледање и оптимизацију електроенергетских система (Application of Deep Learning Methods in Monitoring and Optimization of Electric Power Systems)		
ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:		
<p>Навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, схема, графикона и сл. Дисертација садржи 139 нумерисаних страница, 10 табела, 31 слику и 174 референце.</p> <p>Садржај дисертације по поглављима је следећи:</p> <ol style="list-style-type: none"> <i>Introduction</i> (Увод) <i>Power System State Estimation</i> (Естимација стања у електроенергетским системима) <i>Graph Neural Networks</i> (Графовске неуронске мреже) <i>Graph Neural Network-based State Estimation</i> (Естимација стања базирана на графовским неуронским мрежама) <i>Dynamic Distribution Network Reconfiguration</i> (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже) <i>Reinforcement Learning</i> (Учење подстицајем) <i>Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration</i> (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже базирана на учењу подстицајем) <i>Conclusions</i> (Закључци) 		

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. *Introduction* (Увод)

Прво поглавље дисертације пружа широки преглед тренутног стања у области примене дубоког учења за надгледање и оптимизацију електроенергетских система. Описује се релевантна литература и истраживања која су до сада спроведена у овој области. Поглавље такође уводи предмет истраживања дисертације, а то су проблеми естимације стања електроенергетског система и динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже. Описане су методе које ће бити коришћене - графовске неуронске мреже и учење подстицајем. На крају, даје се преглед доприноса дисертације.

2. *Power System State Estimation* (Естимација стања у електроенергетским системима)

У другом поглављу дисертације пружа се дефиниција два најчешћа приступа решавању проблема естимације стања у преносном електроенергетском систему. Први приступ уважава мерења и из SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) и WAMS (*Wide-Area Monitoring System*) система. Овај приступ се описује системом нелинеарних једначина и традиционално се решава централизовано користећи *Gauss-Newton* метод за итеративно решавање система нелинеарних једначина. Други приступ уважава само фазорска мерења из WAMS система и има линеарну формулацију, што омогућава брже и неитеративно решење проблема.

3. *Graph Neural Networks* (Графовске неуронске мреже)

Треће поглавље дисертације пружа кратак преглед машинског учења на графовима, основе теорије везане за графовске неуронске мреже, и наводи неке практичне аспекте у употреби графовских неуронских мрежа у реалним применама. Главни циљ овог дела је да се пружи контекст потребан за разумевање графовских неуронских мрежа. Кандидат прво уводи дефиницију графа и категоризује најчешће задатке машинског учења на графовима. Затим се даје кратак осврт на традиционалне методе машинског учења на графовима како би се истакла потреба за учењем репрезентација графова. Коначно, пружа се преглед метода учења репрезентација графова, укључујући и графовске неуронске мреже засноване на дубоком учењу.

4. *Graph Neural Network-based State Estimation* (Естимација стања базирана на графовским неуронским мрежама)

У овом поглављу, објашњено је како се графовске неуронске мреже могу применити на проблем линеарне и нелинеарне естимације стања. Са посебном пажњом је обрађен процес трансформације графа електроенергетског система, да би се над њим могао применити предложени метод и дати су детаљи предложене архитектуре графовске неуронске мреже. Такође, анализирана је рачунска сложеност и дистрибуирана имплементација предложеног метода. Тестирањем на електроенергетским системима различитих величина, евалуирана је прецизност предикције предложеног метода у нормалним радним стањима система, као и осетљивост на корумпирана мерења условљена сајбер нападима и губитак улазних података услед неправилности у њиховом преносу.

5. *Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже)

У овом поглављу, представљају се основе статичке и динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже, истичући њихову важност у софтверу за управљање дистрибутивним системом. Такође, пружа се математичка формулација проблема динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже, која ће бити трансформисана у одговарајућу формулацију учења подстицајем у поглављу 7.

6. *Reinforcement Learning* (Учење подстицајем)

У овом поглављу уводи се основна теорија везана за учење подстицајем, фокусирајући се на следеће концепте: коначни Марковљеви процеси одлучивања (МПО), Q -учење и дубоко Q -учење. Коначни МПО се користе за моделовање ситуација у којима је присутан процес секвенцијалног доношења одлука. Објашњава се основна структура МПО-а, као и примена функција награде и прелаза стања. Затим, фокус се премешта на Q -учење, које представља алгоритам за учење подстицајем за проналажење оптималне стратегије у окружењу заснованом на МПО-у. На крају, разматра се дубоко Q -учење, које је модерна варијанта Q -учења која користи дубоке неуронске

мреже. Објашњава се процес тренирања дубоког Q -учења и предности које оно пружа у постизању бољих перформанси у комплексним окружењима.

7. *Reinforcement Learning based Dynamic Distribution Network Reconfiguration* (Динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже базирана на учењу подстицајем)

У овом поглављу описује се начин на који се динамичка реконфигурација дистрибутивне мреже изражава као проблем учења подстицајем. Детаљно се објашњава како се узимају у обзир циљна функција и ограничења, као и алгоритми за обуку и евалуацију предложеног метода заснованог на дубоком Q -учењу. На крају, врши се евалуација перформанси предложеног приступа на три дистрибутивне мреже: тестна мрежа која садржи 15 чворова, стварна велика дистрибутивна мрежа и стандардна *IEEE* мрежа која садржи 33 чвора.

8. *Conclusions* (Закључци)

У завршном поглављу, износе се закључци добијени из истраживања и анализе презентованих резултата. Истичу се главни доприноси дисертације у вези са применом метода дубоког учења за естимацију стања електроенергетског система и динамичку реконфигурацију дистрибутивне мреже. Такође се дискутује о потенцијалним унапређењима и даљим истраживањима која могу произаћи из овог рада. У целини, резултати указују на велики потенцијал примене графовских неуронских мрежа и учења подстицајем у домену електроенергетских система. Овај рад доприноси разумевању и примени ових метода, пружајући основу за даље истраживање и развој напредних техника за надгледање и оптимизацију електроенергетских система.

На основу изложеног, Комисија позитивно оцењује све делове докторске дисертације.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у складу са *Правилима докторских студија Универзитета у Новом Саду* који је повезан са садржајем докторске дисертације. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду уредника часописа о томе.

Списак резултата M21 - Рад у врхунском међународном часопису

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Graph Neural Networks on Factor Graphs for Robust, Fast, and Scalable Linear State Estimation with PMUs. Sustainable Energy, Grids and Networks, pp. 1–16, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101056>.

Списак резултата M23 - Рад у међународном часопису

1. Ognjen Kundacina, Predrag Vidovic, and Milan Petkovic. Solving dynamic distribution network reconfiguration using deep reinforcement learning. Electrical Engineering, pp. 1–15, 2021, DOI: [10.1007/s00202-021-01399-y](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01399-y).

Списак резултата M33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини

1. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Distributed Nonlinear State Estimation in Electric Power Systems using Graph Neural Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9960967).

2. Ognjen Kundacina, Miodrag Forcan, Mirsad Cosovic, Darijo Raca, Merim Dzaferagic, Dragisa Miskovic, Mirjana Maksimovic, and Dejan Vukobratovic. Near Real-Time Distributed State Estimation via AI/ML-Empowered 5G Networks, 2022 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Singapore, 2022, pp. 1–6, DOI: [10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm52983.2022.9961031).

3. Ognjen Kundacina, Mirsad Cosovic, and Dejan Vukobratovic. State estimation in electric power systems leveraging graph neural networks, 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 1-6, 2022, DOI: [10.1109/PMAPS53380.2022.9810559](https://doi.org/10.1109/PMAPS53380.2022.9810559).

4. Ognjen Stanojev, Ognjen Kundacina, Uros Markovic, Evangelos Vrettos, Petros Aristidou, and Gabriela Hug. A reinforcement learning approach for fast frequency control in low-inertia power systems. 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), pp. 1–6. IEEE, 2021, DOI: [10.1109/NAPS50074.2021.9449821](https://doi.org/10.1109/NAPS50074.2021.9449821).

5. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mile Mitrovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Supporting Future Electrical Utilities: Using Deep Learning Methods in EMS and DMS Algorithms, 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), pp. 1-6, 2023, DOI: [10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173](https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094173).

6. Ognjen Kundacina, Gorana Gojic, Mirsad Cosovic, Dragisa Miskovic, and Dejan Vukobratovic. Scalability and Sample Efficiency Analysis of Graph Neural Networks for Power System State Estimation, Sixth International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), Istanbul, 2023, accepted, presented on June 6, 2023.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

Дубоко учење је показало велики потенцијал за унапређење различитих алгоритама у електроенергетским системима, укључујући алгоритме надгледања као што су процена стабилности и откривање локације кварова, као и алгоритме оптимизације попут прорачуна оптималних токова снага. Један од трендова у овој области је употреба графовских неуронских мрежа и учења подстицајем. У овој дисертацији су ове методе примењене на проблеме естимације стања и динамичке реконфигурације дистрибутивних мрежа и показано је да ове методе испољавају висок ниво тачности и побољшане перформансе у поређењу са традиционално коришћеним техникама. Како се ова област наставља развијати, очекује се да ће бити спроведено више истраживања и развоја у овим областима, са фокусом на имплементацију ових техника у

оквиру стварних електроенергетских система ради демонстрације њиховог практичног потенцијала.

Први део ове дисертације истражује како се графовске неуронске мреже могу искористити за брзо и прецизно решавање линеарног и нелинеарног проблема естимације стања у преносним електроенергетским системима. Евалуацијом обученог модела на новим скуповима улазних мерења потврђује се да предложени приступ може бити коришћен као високо прецизан апроксиматор традиционалних решења за естимацију стања, уз додатну предност линеарне рачунске комплексности током процеса предикције. Модел даје добре резултате и у неопсервабилним сценаријима који нису решиви коришћењем традиционалних метода за естимацију стања. Такође, предложени метод је робустан на мерења са високим варијансама, као и на промене улазних података узрокованих сајбер нападима. Предложени приступ показује скалабилност када се тестира на електроенергетским системима различитих величина, као и ефикасност узорковања јер резултије квалитетним предикцијама чак и када је обучен на малом броју насумично генерисаних података. Коначно, предложени метод надмашује устаљене приступе за естимацију стања засноване на дубоком учењу, гледајући тачност предвиђања и значајно мањи број параметара, посебно како се величина електроенергетског система повећава. Коначно, слични закључци могу се пренети и за примене графовских неуронских мрежа на друге формулације проблема естимације стања. На пример, способност предложеног модела да пружи релевантна решења у неопсервабилним сценаријима указује на то да би он могао бити користан за естимацију стања у традиционално неопсервабилним дистрибутивним системима.

Други део ове дисертације истражује вишекритеријумску формулацију проблема динамичке реконфигурације дистрибутивне мреже с циљем минимизовања укупних трошкова губитака енергије и манипулација прекидачком опремом. Предложено решење, засновано на дубоком учењу подстицајем, успешно третира динамичку реконфигурацију дистрибутивне мреже као Марковљев процес одлучивања користећи смањен скуп варијабли стања и рачунски ефикасан приступ за уважавање ограничења броја манипулација прекидачком опремом. Резултати су показали да се развијени алгоритам брже извршава од тренутно коришћених метода, уз постизање сличних вредности оптимизационе функције. Предложени метод је успешно извршен користећи податке извода дистрибутивне мреже са великим бројем чворова, показујући његову скалабилност. Ово истраживање доприноси области управљања и оптимизације електроенергетских система пружањем новог и ефикасног решења за динамичку реконфигурацију дистрибутивних мрежа.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Резултати истраживања у овој дисертацији су добро описани и приказани. Процес генерисања података за потребе обуке и евалуације модела заснованих на дубоком учењу је јасно објашњен, а резултати су презентовани кроз слике, табеле и дијаграме који су лако разумљиви и помажу у њиховом тумачењу. Анализа резултата је концизна, логична и добро усмерена на извођење закључака. Такође, резултати су упоређени са ранијим истраживањима, а дати су и предлози за будућа истраживања и практичну примену. Укратко, начин приказа и тумачења резултата истраживања у овој дисертацији је добро структуриран, јасан и подржан одговарајућим визуелним средствима. Рад је проверен у софтверу за детекцију плагијаризма iThenticate, у Библиотеци ФТН-а, о чему је комисија извештена путем електронске поште.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Да, докторска дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Да, дисертација садржи све битне елементе, укључујући наслов, садржину, резултате и тумачење истих, што се захтева од овакве врсте рада.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Оригинални научни доприноси дела докторске дисертације који се бави естимацијом стања електроенергетских система помоћу графовских неуронских мрежа су следећи:

1. Предложена је оригинална примена графовских неуронских мрежа на фактор графове уместо на традиционални модел електроенергетског система. Ово омогућава флексибилност у интеграцији и искључивању различитих врста мерења на сабирницама и гранама мреже. Представљена је и архитектура графовске неуронске мреже специјализована за примену на фактор графове.

2. Предложени модел има линеарну рачунарску сложеност у односу на величину електроенергетског система, што га чини погодним за примену на велике системе. Такође, његова имплементација је погодна за дистрибуирано извршавање и паралелизацију.

3. Перформансе предложеног модела су евалуиране у различитим сценаријима, укључујући ситуације са недоступним подацима, грешкама у преносу података и злонамерном променом вредности података. Такође, истражена су локална својства модела и показано је да се погоршавање квалитета предикција јавља само у оквиру блиског суседства чвора где се јавља грешка или злонамерна промена података.

Оригинални научни доприноси дела докторске дисертације који се бави динамичком реконфигурацијом дистрибутивне мреже заснованом на учењу подстицајем су следећи:

1. Предложена дефиниција варијабли стања агента заснованог на учењу подстицајем обухвата мањи број величина у поређењу са до сада предложеним приступима. Смањење скупа варијабли стања значајно олакшава примену алгорита у стварном свету, због мањег броја мерења потребних за

извршење алгоритма. Смањење броја варијабли стања такође олакшава тренирање неуронске мреже која се користи у алгоритму.

2. Предложен је ефикасан начин за уважавање ограничења броја манипулација прекидачком опремом приликом избора акција у алгоритму. Овај приступ је омогућен ажурирањем скупа доступних акција током извршавања итерација обуке алгоритма тако да се ограничења броја манипулација прекидачком опремом не крше. Ово поједностављује функцију награде у односу на приступ који дозвољава акције које крше ограничења, али их кажњава великом негативном наградом. Овај начин избора акција може се применити и на сличне проблеме управљања и оптимизације енергетских система.

3. Предложени алгоритам је скалабилан и ефикасан током извршавања, али захтева високо ангажовање рачунарских ресурса током процеса обуке. У поређењу са до сада коришћеним методама, предложени алгоритам показује приближне или боље вредности оптимизационе функције и смањено време извршавања.

4. Који су недостаци дисертације и какав је њихов утицај на резултат истраживања?

У дисертацији нису уочени недостаци који би утицали на резултате истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу наведеног, комисија предлаже:

- а) да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана;**
- б) да се докторска дисертација врати кандидату на дораду (да се допуни односно измени);
- в) да се докторска дисертација одбије.

Место и датум: Нови Сад, 27.6.2023.

1. др Татјана Лончар-Турукало,
редовни професор
_____, председник

2. др Милан Рапаић, редовни
професор
_____, члан

3. др Предраг Видовић, ванредни
професор
_____, члан

4. др Мирсад Ћосовић, доцент
_____, члан

5. др Дејан Вукобратовић, редовни
професор
_____, ментор

6. др Драгиша Мишковић, научни
сарадник
_____, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај и да исти потпише.